

Argamassas de cal aérea com comportamento hidráulico

Aerial lime mortars with hydraulic behaviour

Paulina Faria Rodrigues

Eng. Civil, Assistente, DEC - FCT – Universidade Nova de Lisboa, Caparica, Portugal,
mpr@fct.unl.pt

SUMÁRIO: Tendo em vista contribuir para uma eficiente utilização de argamassas de cal na recuperação de edifícios históricos, desenvolveu-se um programa experimental em que se avaliam os efeitos da indução de comportamento hidráulico em argamassas de cal aérea, através da utilização de componentes como a pozolana natural, cinzas volantes e, após calcinação a diferentes temperaturas, barro vermelho utilizado para o fabrico de telhas cerâmicas e caulino. Apresentam-se os resultados obtidos por uma das formulações preparadas com cada componente, salientando a importância das condições de cura e as vantagens obtidas por comparação com uma argamassa de cal aérea hidratada padrão.

PALAVRAS-CHAVE: cal, pozolana, cinzas, barro vermelho, caulino

ABSTRACT: In order to allow na efficient use of lime mortars for the repair and conservation of historic buildings a research program is being carried out, in which the effects of hydraulic comportment on lime mortars are evaluated. The components used in this study are natural pozzolan, fly ashes and both material for ceramic tiles production and kaolin, after being fired at different temperatures. This paper presents the results obtained with one formulation prepared with each of the different components, emphasising the great influence of the curing conditions in the results and the benefits obtained in comparison with a pure hydrated lime mortar.

KEYWORDS: lime, pozzolan, fly-ashes, ceramic material, kaolin

INTRODUÇÃO

Os edifícios antigos apresentam geralmente rebocos exteriores com base em argamassas de cal. No entanto, este tipo de argamassas caiu em desuso no nosso país com o aparecimento das argamassas de cimento Portland, e só de há alguns anos para cá se tem vindo novamente a atribuir às argamassas de cal aérea a importância devida.

Com vista a obviar ou minorar os inconvenientes das argamassas de cal, tornando-as mais competitivas e adequadas às condições de obra actuais, contribuindo assim para a sua aplicação em conservação de edifícios antigos, têm vindo a ser estudados vários produtos que, adicionados à cal aérea, possam otimizar as características das argamassas antigamente utilizadas.

Os produtos utilizados são a pozolana natural, cinzas volantes e, após calcinação a diferentes temperaturas, material de barro vermelho utilizado para o fabrico de telhas cerâmicas e caulino. Para simplificação do texto, estes constituintes que em contacto com a

cal aérea induzem características hidráulicas às argamassas, passam a ser designados por componentes hidráulicos.

Para comparação com argamassa de cal aérea hidratada e areia, prepararam-se três formulações com cada um dos diferentes componentes (1:0.5:3, 1:1:4 e 1:1.5:5) [1], mantendo a proporção de uma parte de ligante (cal aérea hidratada e componente hidráulico) e duas partes de areia de rio. Utilizou-se sempre a mesma areia de rio e todas as argamassas utilizadas apresentaram espalhamentos comparáveis. Os provetes foram submetidos a cura seca ou a cura húmida, durante dois meses. Para cada tipo de argamassa/condições de cura prepararam-se nove provetes 4 cm x 4 cm x 16 cm.

Através de uma campanha experimental determinaram-se as características obtidas com as diferentes argamassas, em função das matérias primas utilizadas, sua proporção nas dosagens e condições de cura a que foram submetidos os provetes. Com as argamassas frescas procedeu-se à determinação da retenção de água e em três dos provetes procedeu-se a medições da variação linear a partir de 24 horas após a moldagem. Três provetes de cada foram utilizados para a determinação de características mecânicas (módulo de elasticidade, resistência à tracção por flexão e à compressão) e para determinação da massa volúmica aparente e porosidade aberta. Com seis metades dos últimos três provetes determinou-se a capilaridade e a resistência aos sais (cloretos e sulfatos).

Apresentam-se os resultados obtidos por uma das três formulações preparadas com cada um dos diferentes componentes, salientando a influência das condições de cura e as vantagens obtidas por comparação com a argamassa pura de cal.

ESTUDO EXPERIMENTAL

Preparação do material utilizado

Como agregado utilizou-se sempre a mesma areia de rio - **ar** - para não entrar em conta com a variação devida a esse parâmetro. Por facilidade de utilização, empregou-se cal aérea hidratada comercializada ensacada em pó, de marca existente no mercado - **ca**. No entanto, características mais optimizadas poderiam eventualmente ter sido obtidas com a utilização de cal em pasta [2]. Foi utilizada pozolana natural ensacada já moída da ilha de Sto. Antão (Cabo Verde) - **poz**. As cinzas volantes (subproduto industrial das centrais termoeléctricas) foram utilizadas moídas na granulometria geralmente utilizada para a sua incorporação em betões prontos - **cz**.

O material de barro vermelho para fabrico de telhas cerâmicas utilizado foi obtido da recolha feita por despoeiradores de uma fábrica de material cerâmico para construção civil. Este material foi cozido numa mufla durante 3.5 horas a 600°C e a 800°C (**bv600** e **bv800**, respectivamente). O caolino utilizado foi moído e peneirado, tendo-se utilizado o material que passou no peneiro nº30 ASTM. Este material foi sujeito a calcinação numa mufla durante 3.5 horas a 600°C e a 800°C, transformando-se num metacaulino (**cau600** e **cau800**). As temperaturas e períodos de calcinação escolhidos para obtenção destas pozolanas artificiais foram aferidos em [3].

Preparação dos provetes

Na preparação das argamassas utilizou-se sempre o traço 1:2 (ligante:agregado), em que o ligante era cal aérea hidratada juntamente com componente hidráulico. A argamassa de cal aérea e areia foi usada como padrão. Os provetes foram sujeitos a dois tipos de curas: em

ambiente interior controlado a $23\pm3^{\circ}\text{C}$ e $50\pm3\%\text{HR}$ – cura seca S; em ambiente saturado ($\sim 100\%\text{ HR}$) – cura húmida H. Os provetes para determinação de variação linear sujeitos a cura húmida estiveram desde a sua moldagem numa sala de condicionamento húmido, com humidade relativa de $85 \pm 5\%$.

Programa Experimental e Resultados Obtidos

Procedeu-se à determinação da retenção de água com a argamassa fresca, da retracção a partir das 24 horas de amassadura, do módulo de elasticidade dinâmico, resistência à tracção por flexão e resistência à compressão, da massa volúmica e porosidade aberta, da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade, da resistência aos cloretos e aos sulfatos.

Excepto as duas primeiras determinações, todos os ensaios foram realizados após dois meses de cura dos provetes e para uniformidade da metodologia de ensaio, todos os provetes (cura seca ou cura húmida) foram condicionados em estufa a 60°C cerca de cinco dias antes da data de ensaio até atingirem massa constante.

Devido ao elevado número de argamassas diferentes optou-se por apresentar nesta comunicação apenas os resultados de um dos traços estudados. A escolha recaiu na composição 1:0.5:3 (cal aérea : componente hidráulico : areia), passando a identificar-se os respectivos provetes com a designação S e H, consoante tenham sido submetidos a cura seca ou húmida, respectivamente. Estes valores podem ser comparados com os obtidos em [1], relativos à dosagem 1:1:4.

De entre as argamassas que fazem parte deste estudo [1] apresentam-se na tabela 1 as composições de argamassas (dosagem em volume), espalhamento obtido e cura a que foram sujeitas as argamassas em análise nesta comunicação.

Tabela 1 – Composições de argamassas, espalhamento e cura

ARGAMASSA	ca	poz	cz	bv600	bv800	cau600	cau800	Ar	Espalh.	Cura
ca 0	1							2	67	S
pozS	1	0,5						3	70	S
pozH	1	0,5						3	70	H
czS	1		0,5					3	73	S
czH	1		0,5					3	69	H
bv600S	1			0,5				3	72	S
bv600H	1			0,5				3	71	H
bv800S	1				0,5			3	72	S
bv800H	1				0,5			3	74	H
cau600S	1					0,5		3	71	S
cau600H	1					0,5		3	71	H
cau800S	1						0,5	3	69	S
cau800H	1						0,5	3	71	H

Retenção de água

Para determinação da retenção de água seguiram-se os procedimentos definidos em [4], realizando-se o ensaio sobre uma amostra de argamassa fresca, determinando-se a quantidade de água existente nessa amostra e a percentagem de água retida.

Apresentam-se na tabela 2 os resultados de retenção de água obtidos.

Tabela 2 – Retenção de água da argamassa fresca

Argamassa	ca 0	poz	cz	bv600	Bv800	cau600	cau800
Retenção (%)	92	89	88	94	94	89	88

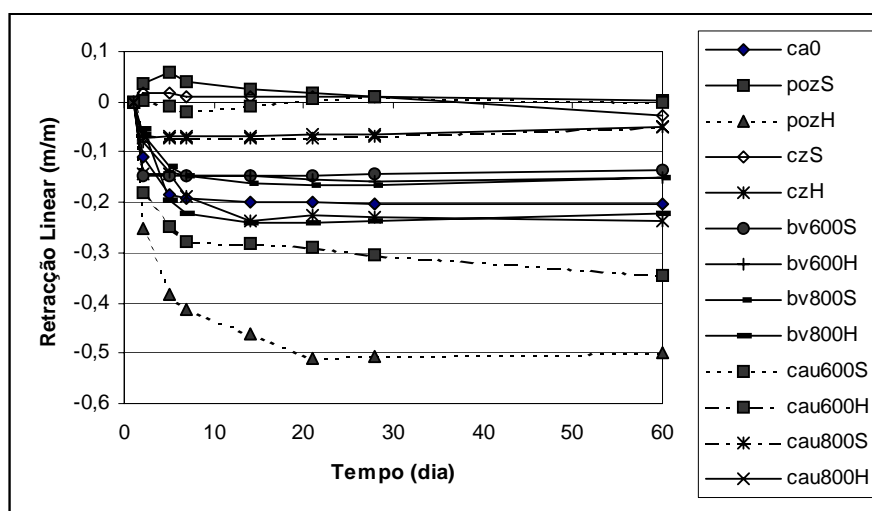
Verifica-se que as argamassas incorporando barro vermelho apresentam valores de retenção relativamente superiores ao registado pela argamassa padrão. As argamassas incorporando pozolana, cinzas volantes e caulino cozido apresentam valores muito idênticos entre si e inferiores ao registado por essa argamassa.

Retracção linear

Para determinação da retracção linear [4, 5] realizaram-se três provetes específicos de cada amassadura em moldes prismáticos 4 cm x 4 cm x 16 cm normais. Logo após a moldagem dos provetes foram inseridos à superfície da massa fresca duas pastilhas com furo reentrante, afastadas entre si 0,10 m. Através da variação da distância medida entre os dois furos das pastilhas com recurso a um alongâmetro, determinaram-se os valores da retracção ocorrida.

Realizaram-se determinações da variação linear às 24 horas de moldagem, 48 horas, 5 , 7 (data de desmoldagem), 14, 21, 28 e 60 dias. Apresenta-se na figura 1 o resultado do ensaio de retracção linear.

Figura 1 – Determinação da retracção linear



A retracção linear apresentada pelas argamassas sujeitas a cura seca é sempre inferior à relativa à argamassa padrão e significativamente menor que a apresentada pelas correspondentes argamassas sujeitas a cura húmida. Verifica-se de um modo geral que as argamassas que apresentam as menores retracções na cura seca, são também as que registam as maiores retracções na cura húmida (poz, cau600, cz); as restantes apresentam retracção inferior à da argamassa padrão.

Módulo de elasticidade dinâmico e resistências à tracção por flexão e à compressão

O módulo de elasticidade dinâmico foi determinado segundo o procedimento definido em [4] e que se baseia na determinação da frequência de ressonância longitudinal, através de equipamento adequado para a emissão de vibrações.

As resistências à tracção por flexão e à compressão foram determinadas segundo os procedimentos definidos em [4], sendo a tracção imposta por uma flexão em três pontos e a compressão efectuada sobre cada um dos meios provetes resultantes do ensaio de flexão.

Apresentam-se no quadro 3 os valores dos ensaios mecânicos de módulo de elasticidade dinâmico e de resistências à tracção por flexão e à compressão.

Tabela 3 - Módulo de elasticidade dinâmico e resistências à tracção e à compressão

Argam.	ca 0			poz		cz		bv600		bv800		cau600		cau800	
	S	S	H	S	H	S	H	S	H	S	H	S	H	S	H
E (Mpa)	2638	4424	4462	2083	6710	1489	3417	1830	4662	2008	4401	3008	4895		
Tracção (Mpa)	0,17	0,26	0,13	0,26	0,32	0,27	0,16	0,28	0,20	0,38	0,33	0,60	0,52		
Compres. (Mpa)	0,7	1,0	1,5	0,5	1,4	0,5	0,8	0,7	1,1	1,2	2,2	2,0	3,0		

Excepto no caso de argamassas incorporando cinzas volantes, verifica-se que para os mesmos traços, os valores mais altos de resistência à tracção por flexão se verificam para provetes sujeitos a cura seca. Pelo contrário, estes mesmos provetes sujeitos a cura húmida apresentam sempre valores mais altos de resistência à compressão relativamente aos provetes dos mesmos traços submetidos a cura seca.

Massa volúmica aparente, porosidade aberta, absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade

A determinação da massa volúmica aparente e da porosidade aberta foi realizada de acordo com os procedimentos definidos em [4], através da saturação total em água sob vácuo e método da pesagem hidrostática.

O ensaio de capilaridade foi realizado de acordo com os procedimentos definidos em [4], colocando um topo dos seis meios provetes de cada amassadura em 2mm de altura de água potável sobre papel absorvente, dentro de uma caixa fechada de modo a manter constantes as condições de humidade e para reduzir o volume de água evaporada dos provetes. Os ensaios decorreram até aos provetes ficarem saturados com água absorvida por capilaridade.

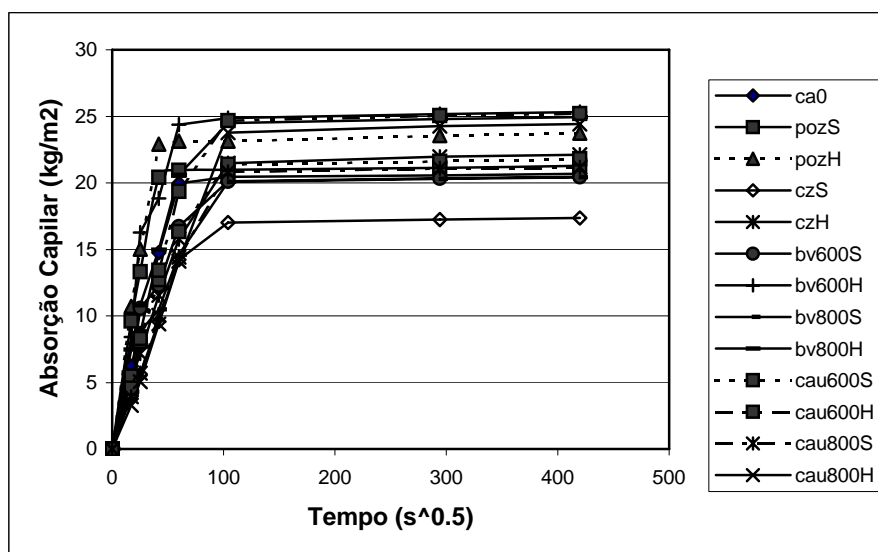
Os resultados dos ensaios de massa volúmica aparente, porosidade aberta, absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade são apresentados na tabela 4 e figura 2.

Tabela 4 - Massa volúmica aparente, porosidade aberta, absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade

Argamassa	ca 0			poz		cz		bv600		bv800		cau600		cau800	
	S	S	H	S	H	S	H	S	H	S	H	S	H	S	H
Massa Vol. (kg/m ³)	1720	1666	1627	1805	1755	1719	1674	1746	1677	1698	1651	1701	1672		
Porosidade (%)	34	35	37	30	32	34	35	33	35	35	36	35	35		
Coeficiente Capilaridade (kg/m ² .s ^{0.5})	0,34	0,43	0,48	0,24	0,26	0,29	0,45	0,25	0,33	0,30	0,32	0,24	0,22		
Absorção Capilar (kg/m ²)	20,7	21,3	23,8	17,4	22,1	20,5	25,3	20,4	24,9	21,8	25,2	21,2	24,4		

No ensaio de capilaridade registou-se graficamente a quantidade de água absorvida em kg/m² relativamente à raiz quadrada do período de tempo decorrido, em s^{0.5}. Determinou-se a absorção de água por capilaridade através do valor assintótico da curva registada em gráfico para cada argamassa e o coeficiente de capilaridade (em kg/m².s^{0.5}), através do coeficiente angular da mesma curva.

Figura 2 – Ensaio de capilaridade



Comparando os resultados obtidos com a mesma composição, a massa volúmica aparente é sempre menor nos provetes sujeitos a cura húmida. A argamassa de cal apresenta valores próximos dos apresentados pelas argamassas com barro vermelho. As argamassas com cinzas apresentam valores sensivelmente superiores e as argamassas com pozolanas e caulino, valores ligeiramente inferiores. Relativamente à porosidade aberta verifica-se que

os valores apresentados pelos provetes submetidos a cura húmida são sempre ligeiramente superiores aos correspondentes na cura seca e, à excepção das argamassas com cinzas, todas as argamassas apresentam valores da mesma ordem ou ligeiramente superiores aos da argamassa padrão.

Pela tabela e figura apresentada verifica-se que a absorção capilar não apresenta variação significativa com os diferentes tipos de ligantes utilizados para os provetes sujeitos a cura seca, sendo valores inferiores apresentados pelas argamassas com cinzas. Mas em todos os casos os valores apresentados pelos provetes sujeitos a cura húmida são superiores aos correspondentes submetidos a cura seca e superiores aos apresentados pela argamassa padrão, factos que comprovam os valores da porosidade aberta registados.

Relativamente ao coeficiente de capilaridade, relacionado com a absorção capilar inicial, verifica-se a mesma relação entre provetes submetidos a cura húmida relativamente aos sujeitos a cura seca, excepto no caso do caulino calcinado a 800°C. Os provetes com cinzas e com caulino a 800°C apresentam os valores mais baixos, enquanto aqueles com pozolanas registam os valores mais fortes.

Resistência à acção de cloretos e de sulfatos

Para a realização do ensaio de resistência aos cloretos [4], três dos seis meios provetes de cada amassadura, secos até massa constante após o ensaio de capilaridade, foram imersos numa solução saturada em cloreto de sódio por 24 horas, e de novo secos em estufa até atingirem massa constante. Através da diferença entre as massas secas dos provetes antes e após imersão na solução, determinou-se a quantidade de cloretos retidos, em termos de percentagem em relação à sua massa seca inicial. Os meios provetes foram então colocados numa câmara climática onde foram sujeitos a ciclos diários sucessivos de 12 horas a 90% HR e 12 horas a 40% HR (mantendo-se uma temperatura constante de 20°C), determinando-se semanalmente a perda de massa que ia ocorrendo, até completarem 50 ciclos.

Tabela 5 - Resistência à acção de cloretos e de sulfatos

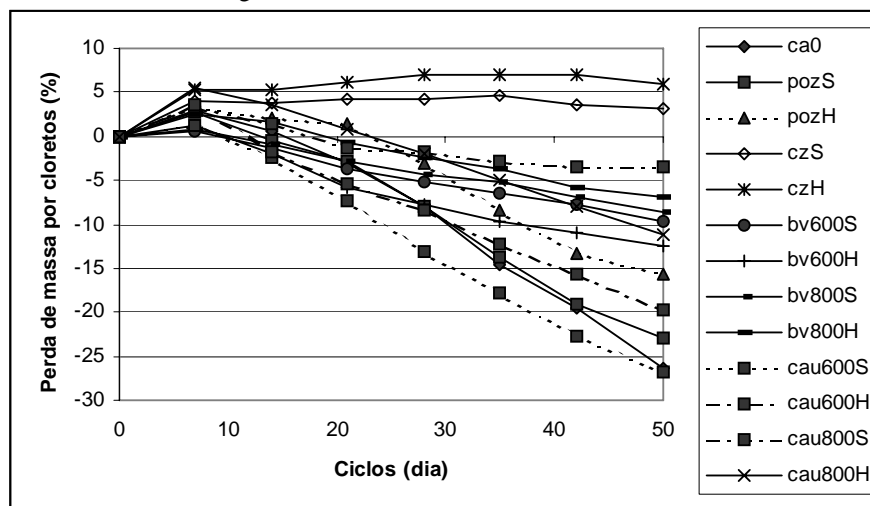
Argamassa	ca 0	poz		cz		bv600		bv800		cau600		cau800	
	S	S	H	S	H	S	H	S	H	S	H	S	H
Cloretos													
Retidos (%)	4,1	-	-	3,5	4,6	2,6	4,0	2,8	3,7	4,8	6,5	4,6	5,2
Perda por Cloretos (%)	-26,4	-23,0	-15,7	3,2	6,0	-9,6	-12,5	-8,7	-6,9	-26,7	-34,0	-19,8	-11,2
Perda por Sulfatos (%)													
2°C	-4,2	0,6	2,7	4,2	-6,4	-9,1	-100	-13,2	-65,9	-9,7	-36,2	-0,5	-2,2
5°C	-81,3	-100	-100	-62,0	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100

Para a realização do ensaio de resistência aos sulfatos [4], os restantes três dos seis meios provetes de cada amassadura, secos até massa constante após o ensaio de capilaridade, foram sujeitos a ciclos diários de imersão numa solução saturada em sulfato de sódio por 2

horas e de novo colocados em estufa por aproximadamente 22 horas, após as quais eram pesados e avaliado o seu estado de integridade. A sequência foi repetida até se completarem 5 ciclos imersão/secagem/pesagem ou até à rotura completa dos provetes.

Os resultados dos ensaios de resistência às acções de cloretos e de sulfatos são apresentados na tabela 5 e figuras 3 e 4. Como o ensaio de resistência aos sulfatos demonstrou ser muito destrutivo, apresenta-se na tabela 5 a perda de massa ocorrida não só ao 5º mas também ao 2º ciclos.

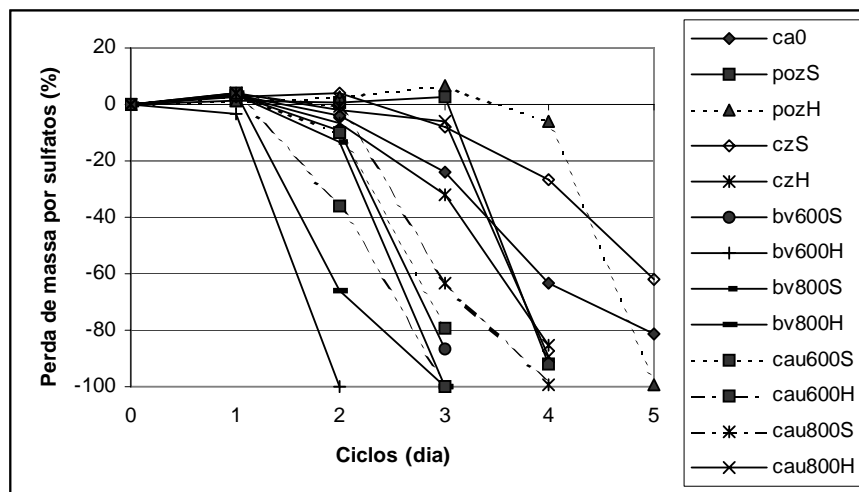
Figura 3 – Ensaio de resistência aos cloretos



Relativamente à resistência aos cloretos verifica-se que as argamassas sujeitas a cura húmida apresentam sempre percentagem mais elevada de cloretos retidos (contrariamente ao que sucedia com a dosagem 1:1:4) porque a sua porosidade é maior; no entanto, excepto as argamassas incorporando pozolanas artificiais calcinadas a 600°C (caulino e barro vermelho), são os provetes submetidos a cura húmida que registam maior resistência aos cloretos, relativamente aos sujeitos a cura seca. Mesmo as curas secas apresentam resistência aos cloretos superior à da argamassa padrão só de cal. Como seria expectável, a diferença de comportamentos aferida entre as diferentes curas é inferior à registada com a dosagem 1:1:4 [1] devido à menor quantidade de componente hidráulico nas argamassas agora em análise.

As argamassas incorporando bv600, bv800 e cau600 apresentam baixa resistência aos sulfatos. Nas argamassas contendo componente hidráulico, a resistência aos sulfatos é superior na cura seca comparativamente à cura húmida, contrariamente ao que sucedia com a dosagem 1:1:4 (excepto nos casos de poz e de cau800), mais uma vez devido à reduzida quantidade de componente hidráulico presente nas argamassas agora em análise.

Figura 4 – Ensaio de resistência aos sulfatos



DISCUSSÃO

A retenção de água de todas as argamassas em análise apresenta valores altos, com benefícios inerentes ao nível da aplicação das argamassas em condições de secagem ambiente mais adversas (calor, vento seco) e diminuindo os efeitos de uma sucção demasiado forte por parte do suporte ou dos elementos que constituem as alvenarias.

As argamassas analisadas registam retracção linear inferior à da argamassa padrão, excepto no caso da pozH e cau600H, o que surge como muito positivo. No entanto, devido à primeira medição ser realizada 24 horas após a moldagem da argamassa, presume-se que parte significativa da retracção inicial de secagem dos provetes S possa já ter ocorrido, sem ter sido quantificada. Recomenda-se assim que a comparação seja realizada entre argamassas sujeitas ao mesmo tipo de cura e não entre curas diferentes.

Nos provetes sujeitos a cura seca, admite-se que os poros da argamassa perdem a água e contraem juntamente com o endurecimento da argamassa, reduzindo de tamanho; pelo contrário, nos provetes H, a argamassa prossegue a sua cura e endurecimento com os poros cheios de água, e estes mantêm as suas dimensões porque quando a água é perdida a massa já está endurecida. Daí a massa volúmica ser mais elevada na cura S relativamente à cura H (e o inverso se passar com a porosidade), devido à diferente porometria dos produtos finais. Esta maior dimensão dos poros pode justificar a mais alta absorção capilar apresentada pelas argamassas H mas também a maior resistência das argamassas sujeitas a cura H à acção dos cloretos, nomeadamente por existir volume de poro suficiente para aí ocorrer a cristalização dos sais sem danificar a massa envolvente.

É sabido que os sulfatos reagem com os aluminatos produzindo sulfoaluminatos expansivos. Daí ser expectável a resistência à acção dos sulfatos ser melhor em argamassas puras de cal, onde os aluminatos não estão presentes ou apenas se encontram em pequena concentração, relativamente às argamassas com componentes hidráulicos.

CONCLUSÕES

Verifica-se que com a dosagem em análise nesta comunicação (1:0,5:3 de cal aérea:componente hidráulico:areia), o comportamento hidráulico não é tão eficiente como quando se utiliza a dosagem 1:1:4 [1], devido à sua reduzida proporção nas argamassas. No entanto algumas das características analisadas são mesmo assim melhoradas comparativamente às apresentadas pela argamassa padrão e surgem novas evidências que continuam a ser investigadas. Pelas diferenças de comportamento entre as amostras sujeitas a cura seca e a cura húmida, continua muito evidente a importância das condições de cura nas características finais das argamassas depois de aplicadas.

Agradecimentos

A autora agradece a colaboração no trabalho experimental das alunas Paula Albuquerque e Ana Brás da licenciatura em Engenharia Civil da FCT, e a disponibilização de caulino, barro vermelho, cinzas volantes e pozolana natural para os ensaios respectivamente ao Eng. Carlos Galhano da FCT-UNL e às firmas LUSOCERAM, SECIL e TECNOCRETE.

REFERÊNCIAS

1. RODRIGUES, P.; HENRIQUES, F. – The effect of hydraulic components on lime mortars, XXX IAHS World Congress on Housing, 2002, Coimbra, Portugal, Eds.O. Ural, V. Abrantes, A. Tadeu, pp.1711-1718.
2. RODRIGUES, P. – Estudo comparativo de diferentes argamassa tradicionais de cal aérea e areia, PATORREB – 1º Encontro Nacional sobre Patologia e Reabilitação de Edifícios, Porto, 2003 (comunicação a publicar).
3. COUTINHO, A. Sousa – Pozolanas, betões com pozolanas e cimentos pozolânicos, Memória 136, Lisboa, LNEC, 1958.
4. HENRIQUES, F.- Pedras naturais e artificiais. Análise de argamassas. Fe 01, 02, 06, 08, 11, 12, 15, 19, 20, 25, 27, 32 UNL/DEC UNL/FCT. Caparica, 1996 a 2002 (especificações de ensaio).
5. RODRIGUES, P. - Revestimentos de impermeabilização de paredes à base de ligantes minerais – Modelização experimental de revestimentos aplicados sobre um suporte, dissertação de mestrado, LNEC/CSTB, IST, 1993.